硫化－胺盐浮选体系中矿泥对泡沫稳定性的影响*

赵一帆[1]，来庆腾[1]，廖寅飞[2]，贺玉程[1]，刘泽晨[1]，廖炎望[1]，丁世豪[1]

(1. 中国矿业大学 化工学院，江苏 徐州 221116；2. 中国矿业大学 国家煤加工与国家煤加工与洁净化工程技术研究中心，江苏 徐州 221116)

摘　要：矿泥和过稳定泡沫一直是困扰氧化锌矿硫化－铵盐浮选过程的难题。在硫化－胺盐浮选体系中开展了气－液两相和气－液－固三相的泡沫稳定性试验，选取石英、方解石和褐铁矿作为典型矿泥，考察了十二胺用量、硫化钠用量、pH值、矿泥种类和粒度对泡沫稳定性的影响，分析了矿泥对泡沫稳定性影响的内在机理。结果表明：随着十二胺用量的增大，最大泡沫高度和半衰期逐渐增大，泡沫稳定性逐渐增强；随着硫化钠用量的增大，最大泡沫高度和半衰期先增大后减小，泡沫稳定性先增强后变差；相同条件下三相泡沫的最大高度和半衰期明显大于两相泡沫，矿泥对泡沫稳定性具有显著的强化作用，而且这种强化作用随着矿泥的粒度减小而逐渐增强，不同种类矿泥对泡沫稳定性增强作用大小关系为褐铁矿＞方解石＞石英。

关键词：矿泥；泡沫稳定性；硫化－胺盐浮选；粒度

中图分类号：TD923　**文献标识码**：B　**文章编号**：1001－0076(2017)03－0052－06

DOI：10.13779/j.cnki.issn1001－0076.2017.03.010

Effect of Slime on Foam Stability in Ammonium Sulfide Flotation System

ZHAO Yifan[1]，*LAI Qingteng*[1]，*LIAO Yinfei*[2]，*HE Yucheng*[1]，
LIU Zechen[1]，*LIAO Yanwang*[1]，*DING Shihao*[1]

(1. School of Chemical Engineering & Technology，CUMT，Xuzhou 221116，China；2. National Engineering Research Center of Coal Preparation and Purification Technology，CUMT，Xuzhou 221116，China)

Abstract：The zinc oxide ore flotation process using ammonium sulfide is troubled with the problems of the slime and the foam stability. The foam stability experiment with gas－liquid two phase and gas－liquid－solid three phase was carried out in ammonium sulfide flotation system. Quartz，calcite and limonite were selected as the typical slime. The effect of dodecyl amine dosage，sodium sulfide dosage，pH，slime type and size on foam stability was investigated. The influence mechanism of slime on the foam stability was also analyzed. The results showed that the foam stability，namely maximum height and half－life，increased with the dosage of dodecyl amine. The maximum height and half－life firstly increased and then decreased with the dosage of sodium sulfide. The maximum height and half－life of gas－liquid－solid three phases were clearly higher than those of gas－liquid two phases. It indicated that slime enhanced the foam stability and the enhancement effect increased with the decrease of the slime size. The relative order of enhancement effect on foam stability for the three kind of slime was given：limonite＞quartz＞calcite.

Key words：oam stability；foam stability；ammonium sulfide flotation；particle size

* **收稿日期**：2017－03－07

基金项目：江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20150192)

作者简介：赵一帆(1992－)，男，汉族，河北新乐人，在读硕士研究生，主要研究方向是柱式分选理论与选矿过程设计，E－mail：1034027317@qq.com。

万方数据

前 言

锌是我国重要的战略性矿产资源,锌约占十种常用有色金属生产、消费总量的 30% 以上,氧化锌矿资源约占全球锌总储量的 23%,而我国已探明的氧化锌矿的锌金属储量高达 4 000 万 t[1]。氧化锌矿在其形成过程中产生大量赭土,极易泥化,形成大量的矿泥。硫化 – 胺盐浮选法是回收氧化锌矿最主要的选矿方法,但它对矿泥较为敏感[2]。胺盐是一种阳离子捕收剂,它具有泡沫量大、泡沫发粘和不易消散等特点。大量矿泥的存在加剧了氧化锌矿硫化 – 铵盐浮选过程的泡沫过稳定问题,导致经常出现大量粘性泡沫堆积的现象,甚至用高压水都无法冲消,往往导致大量泡沫跑槽,恶化浮选效果,严重时还会导致停产。矿泥和过稳定泡沫一直是困扰氧化锌矿硫化 – 铵盐浮选过程的难题。

国内外学者对矿泥影响氧化锌浮选过程进行了大量研究。朱从杰等[3]研究了石英、方解石和褐铁矿三种矿泥对菱锌矿浮选行为的影响,结果表明 –5 μm 矿泥的影响最大,褐铁矿的影响大于石英和方解石。李明晓等[4]研究表明:适当的脱泥量是保证高泥氧化锌矿浮选指标的重要因素。杨柳毅等[5]采用预先脱泥 – 硫化 – 铵法浮锌工艺,选用新型捕收剂 HHA,组合使用水玻璃和六偏磷酸钠作为脉石抑制剂和矿泥分散剂,获得了较好的分选指标。陈晔等[6]考察了脱泥条件、硫化钠用量、分散剂种类和用量以及胺种类和用量对异极矿浮选指标的影响,结果表明预先脱泥能够有效改善氧化锌矿石浮选指标。卢建安等[7]研究发现使用混合抑制剂对含泥氧化锌矿中褐铁矿的抑制具有很好的效果。李柏淡等[8]研究了氧化锌矿石的胺法浮选工艺,考察了去除浮选前预先脱泥作业的可行性和工艺条件。周怡玫等[9]采用螺旋溜槽脱泥、摇床富集、浮选的联合流程分选高泥氧化锌矿,获得锌品位 33%、回收率 86% 的氧化锌精矿。综上所述,虽然国内外学者对矿泥影响氧化锌浮选做了大量的工作,但是从泡沫稳定性层面分析矿泥影响氧化锌矿浮选机理的却鲜见报道。

针对矿物浮选过程中的泡沫稳定性,研究人员开展了大量卓有成效的工作。梁永忠等[10]研究了滑石得泡沫稳定性及浮选行为,分析了矿物粒度、矿物表面疏水性、起泡剂的种类和浓度、调整剂等因素对滑石泡沫稳定性的影响,得出了一系列有实用价值的规律。邓海波等[11]利用亲水 – 疏水平衡值(HLB)分析比较了不同捕收剂的性能,通过二相泡沫试验方法比较了不同捕收剂的浮选泡沫稳定性。韩来兵等[12]研究发现:随着捕收剂、起泡剂浓度的增加,泡沫稳定性逐渐增大;当药剂达到一定浓度时,泡沫稳定性到达最大值,继续增大药剂浓度,泡沫稳定性有下降趋势,起泡剂与捕收剂的交互作用对泡沫稳定性产生了更加复杂的影响。冉进财等[13]研究了不同离子种类和含量对两相泡沫和粉煤灰浮选三相泡沫稳定性的影响,并进行了浮选验证。穆枭等[14]研究了表面疏水的一水硬铝石对铝土矿三相泡沫稳定性的影响规律,结果表明,影响三相泡沫稳定性的因素主要有颗粒大小、固体浓度和颗粒的疏水性。张文才[15]以动态泡沫层稳定性参数和浮选水回收率表征泡沫层稳定性,在气 – 液两相体系和气 – 固 – 液三相体系下研究了各种浮选条件对泡沫层稳定性的影响规律,以及铝土矿柱浮选泡沫层稳定性和分选效果的关系。徐振洪等[16]采用充气法对多种起泡剂的性能进行了测试,分析了同一起泡剂不同浓度下的泡沫高度与半衰期之间的关系。上述研究泡沫稳定性的方法和手段为查明硫化 – 胺盐浮选体系中矿泥对泡沫稳定性的影响提供了参考和依据。

本文在硫化 – 胺盐浮选体系中开展了气 – 液两相和气 – 液 – 固三相的泡沫稳定性试验,选取氧化锌矿的主要脉石矿物石英、方解石及褐铁矿加工成人工矿泥,考察了十二胺用量、硫化钠用量、pH 值、矿泥种类和粒度对泡沫稳定性的影响,分析了硫化 – 胺盐浮选体系中矿泥对泡沫稳定性影响的内在机理。

1　试验样品与药剂

1.1　试验样品

矿泥通常是指矿石中的细泥部分,一般将小于 25 μm 的矿粒群视为矿泥。选取氧化锌矿的主要脉石矿物石英、方解石及褐铁矿加工成人工矿泥。实验所用菱锌矿、石英、方解石和褐铁矿统一购买自某矿物材料公司,经人工拣选、破碎、磨矿制成平均粒径 23 μm、13 μm、5 μm 三种粒级。由于褐铁矿磨细后在蒸馏水中存在严重的互凝现象,本试验只制得粒度为 13 μm 样品。对纯矿物石英、褐铁矿、方解

万方数据

石的纯度进行分析,结果表明三种矿物的纯度都在98%以上,符合试验要求。

1.2　试验药剂

实验所用药品清单如表 1 所示。

表 1　试验药剂

药剂种类	化学式	纯度
十二胺	$C_{12}H_{27}N$	分析纯
硫化钠	Na_2S	分析纯
碳酸钠	Na_2CO_3	分析纯

2　试验方法

传统的泡沫稳定性测试方法包括气流法、倾注法和搅动法[13]。其中气流法具有简洁、直观、易于操作的优点,在泡沫稳定性测试中应用最为广泛。该方法主要是通过玻璃砂芯板将起泡液阻隔在起泡管内,然后采用充气装置将一定流速的气体通过玻璃砂板充入,从而在起泡管内形成泡沫。当气体流速一定时,一段时间后,起泡体系将会达到动态平衡,此时的泡沫总高度可以表征体系起泡性能的大小。本文将浮选预调浆过程和气流法起泡过程结合起来,构建了一套浮选泡沫稳定性的测试装置(图1),装置由浮选机、起泡管、充气泵组成,其中浮选机用于起泡矿浆或溶液的预调浆。泡沫稳定性测试过程如下:

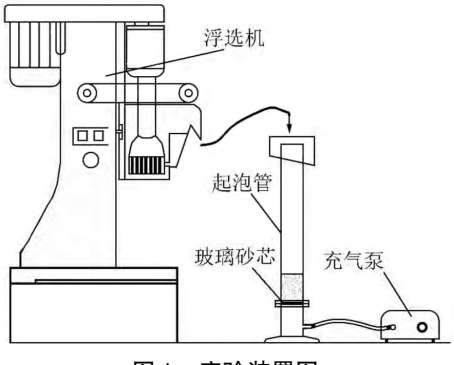

图 1　实验装置图

(1)起泡溶液或矿浆的制备。称取一定质量的待测样品,在 XFD－0.75L 单槽浮选机上调浆,调浆时间5 min,根据试验组别需要按照浮选调浆的步骤加入捕收剂、调整剂;

(2)泡沫稳定性测试。抽取待测矿浆或溶液300 mL,迅速转移至泡沫稳定性测试管,固定充气流量,充气 15 s 后停止,记录停止充气时的泡沫高度(即最大泡沫高度),并记录该泡沫高度衰减到一半时所需的时间(即泡沫半衰期)。

万方数据

3　结果与讨论

3.1　两相泡沫稳定性

3.1.1　十二胺用量对泡沫稳定性的影响

按照上述试验方法,固定 pH＝7,调整十二胺用量和充气量,记录停止充气时的泡沫高度(即最大泡沫高度),并记录该泡沫高度衰减到一半时所需的时间(即泡沫半衰期),得到最大泡沫高度和泡沫半衰期随十二胺用量的变化规律,结果如图 2 和图3 所示。

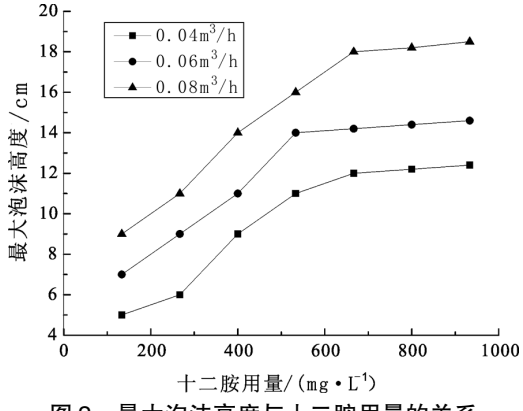

图 2　最大泡沫高度与十二胺用量的关系

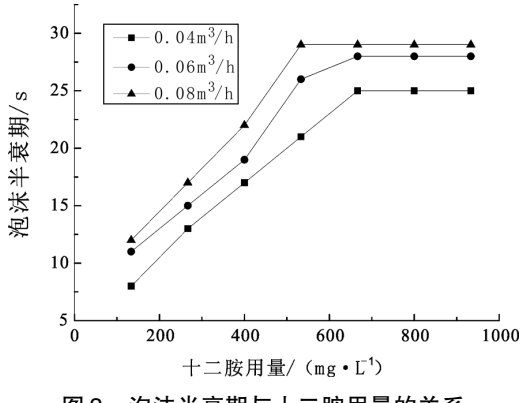

图 3　泡沫半衰期与十二胺用量的关系

由图 2 可知,随着十二胺用量的增大,最大泡沫高度先逐渐增大,当十二胺用量为 600 mg/L 时,最大泡沫高度达到最大值,而后保持不变。由图 3 可以看出,随十二胺用量的增大,泡沫半衰期表现出与最大泡沫高度类似的变化规律,即先逐渐增大,当十二胺用量为 600 mg/L 时,泡沫半衰期达到最大值,而后保持不变。上述结果表明,随着十二胺

用量的增大,泡沫的稳定性先逐渐增强而后保持不变,这与十二胺降低了溶液的表面张力有关,但当十二胺达到其临界胶束浓度后,溶液的表面张力不再减小,其对应的泡沫稳定性也趋于不变[12]。另外,从图 2 和图 3 可以看出,在相同的十二胺用量的条件下,随着充气量的增大,最大泡沫高度和半衰期逐渐增大,这表明充气量的增大有助于增强泡沫稳定性。

3.1.2　硫化钠用量对泡沫稳定性的影响

按照上述试验方法,固定十二胺用量 100 mg/L、充气量 0.04 m^3/h,调整硫化钠用量,记录对应的最大泡沫高度和泡沫半衰期,得到最大泡沫高度和泡沫半衰期随硫化钠用量的变化规律,结果如图 4 和图 5 所示。

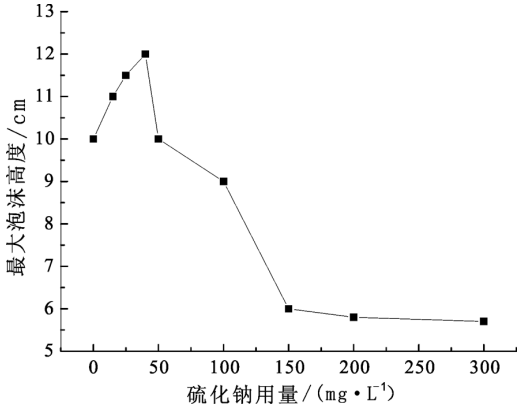

图 4　最大泡沫高度随硫化钠用量变化图

由图 4 可知,随着硫化钠用量的增大,最大泡沫高度先逐渐增大,当十二胺用量为 30 mg/L 时,最大泡沫高度达到最大值,而后逐渐减小。

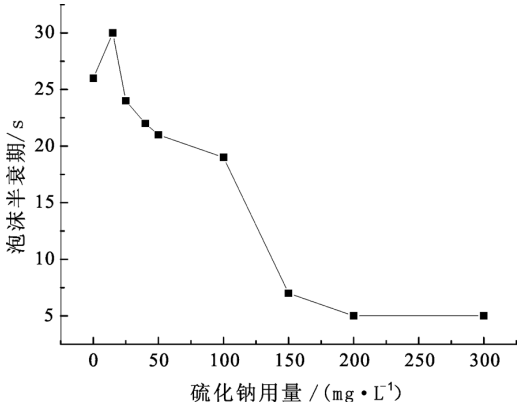

图 5　泡沫半衰期随硫化钠用量变化图

万方数据

由图 5 可以看出,随硫化钠用量的增大,泡沫半衰期表现出与最大泡沫高度类似的变化规律,即先逐渐增大,当十二胺用量为 30 mg/L 时,泡沫半衰期达到最大值,而后逐渐减小。上述结果表明,随着硫化钠量的增大,泡沫的稳定性先逐渐增强而后逐渐减小,这可能是由于硫化钠电离、水解生成的 S^{2-}、HS^- 和阳离子捕收剂十二胺发生反应降低了泡沫稳定性。

3.1.3　pH 值对泡沫稳定性的影响

按照上述试验方法,固定十二胺用量 100 mg/L、充气量 0.04 m^3/h,调整溶液 pH 值,记录对应的最大泡沫高度和泡沫半衰期,得到最大泡沫高度和泡沫半衰期随溶液 pH 值的变化规律,结果如图 6 和图 7 所示。

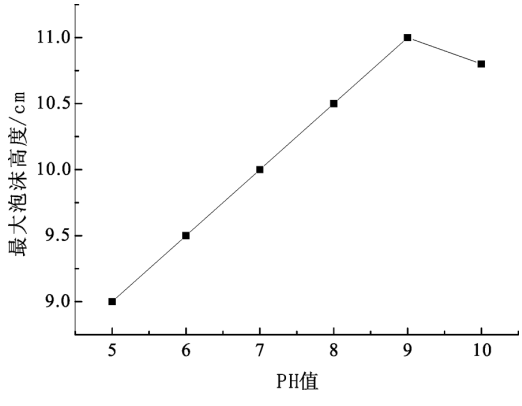

图 6　最大泡沫高度随 pH 变化图

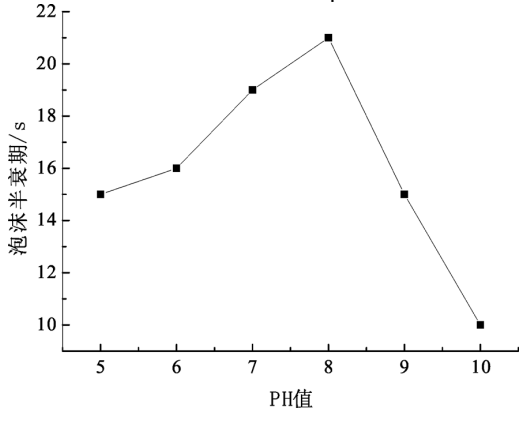

图 7　泡沫半衰期随 pH 变化图

由图 6 和图 7 可知,随 pH 值的增大,最大泡沫高度和半衰期都呈现出先变大后减小的趋势,在 pH 为 8 ~ 9 达到最大值。上述结果表明,随 pH 的增大泡沫稳定性先逐渐增强后逐渐减弱,这可能是由于 $NaCO_3$ 的加入,产生反离子效应,减小了的亲水基间

的电斥力,降低了体系的能量,也就是说使体系的表面能减小,增加了表面活性,从而稳定了泡沫。

3.2　三相泡沫稳定性

3.2.1　石英对泡沫稳定性的影响

按照上述试验方法,固定 pH 值为 9、充气量 0.04 m^3/h,调整石英粒度和十二胺用量,记录对应的最大泡沫高度和泡沫半衰期,得到最大泡沫高度和泡沫半衰期随石英粒度和十二胺用量的变化规律,结果如图 8 和图 9 所示。

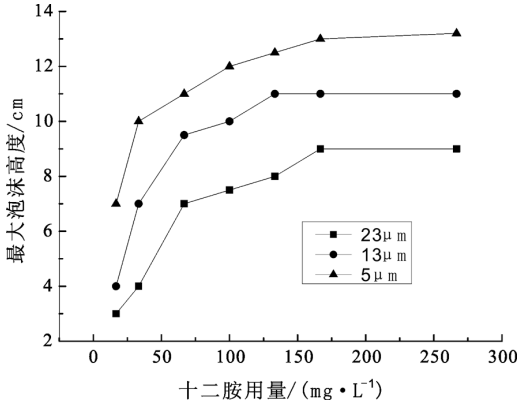

图 8　最大泡沫高度随十二胺用量变化图

由图 8 可知,随着十二胺用量的增大,最大泡沫高度先逐渐增大,当十二胺用量为 120 mg/L 时,最大泡沫高度达到最大值,而后保持不变。

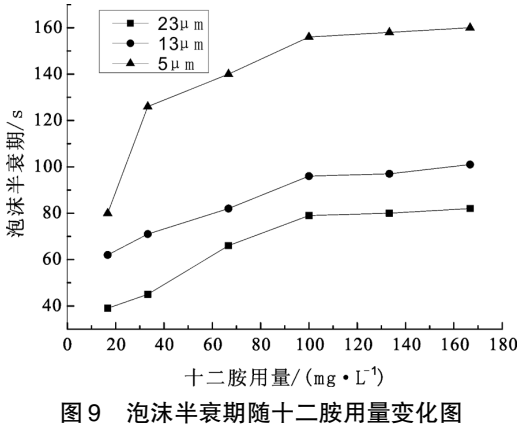

图 9　泡沫半衰期随十二胺用量变化图

由图 9 可以看出,随十二胺用量的增大,泡沫半衰期表现出与最大泡沫高度类似的变化规律,即先逐渐增大,当十二胺用量为 120 mg/L 时,泡沫半衰期达到最大值,而后保持不变。另外,从图 8 和图 9 可以看出,在相同的十二胺用量的条件下,随着石英粒度的减小,最大泡沫高度和半衰期逐渐增大,这表明石英粒度的减小有助于增强泡沫稳定性。这可能是由于细粒具有很大的比表面积,表面能很高,能够较稳定地粘附于气泡上,罩盖紧密,阻碍气泡与气泡之间,气体透过液膜的扩散,减小气泡间的兼并,阻碍泡沫中液体的流失,降低液膜的排液速率,从而提高泡沫的稳定性。

3.2.2　方解石对泡沫稳定性的影响

按照上述试验方法,固定 pH 值为 9、充气量 0.04 m^3/h,调整方解石粒度和十二胺用量,记录对应的最大泡沫高度和泡沫半衰期,得到最大泡沫高度和泡沫半衰期随方解石粒度和十二胺用量的变化规律,结果如图 10 和图 11 所示。

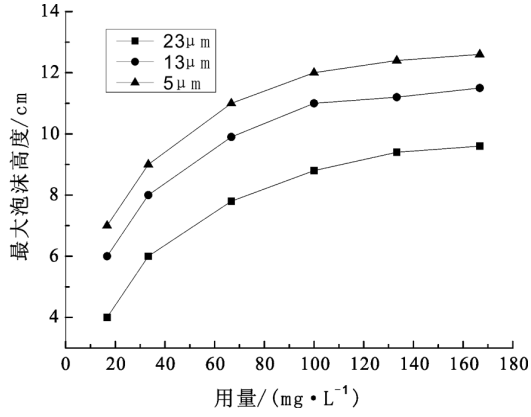

图 10　最大泡沫高度随十二胺用量变化图

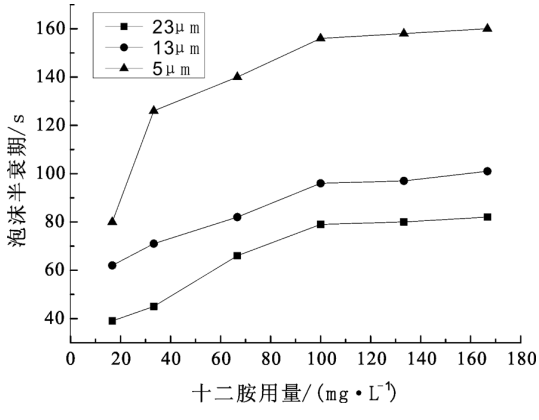

图 11　泡沫半衰期随十二胺用量变化图

由图 10 和图 11 可以看出,随十二胺用量的增大,方解石泡沫稳定性表现出与石英泡沫稳定类似的变化规律,即先逐渐增强,当十二胺用量为 120 mg/L 时,最大泡沫高度和泡沫半衰期达到最大值,而后保持不变。在相同的十二胺用量的条件下,随着方解石粒度的减小,最大泡沫高度和半衰期逐渐

万方数据

增大,这表明方解石粒度的减小有助于增强泡沫稳定性。另外,在相同十二胺用量和相同粒度条件下,加入方解石矿泥的最大高度比加入石英矿泥的最大高度要高,加入方解石矿泥的半衰期比加入石英矿泥的半衰期时间要长。例如在十二胺用量 80 mg/L,石英、方解石的粒度 13 μm,加入方解石矿泥的最大高度为 10 cm,加入石英矿泥的最大高度为 8 cm,方解石最大泡沫高度比石英最大泡沫高度要高 2 cm;加入方解石矿泥的半衰期为 80 s,加入石英矿泥的半衰期 34 s 方解石泡沫半衰期比石英泡沫半衰期要长 46 s。这表明方解石矿泥对泡沫稳定性的影响要大于石英矿泥。

3.2.3　褐铁矿对泡沫稳定性的影响

按照上述试验方法,固定 pH 值为 9、充气量 0.04 m^3/h、褐铁矿粒度为 13 μm,调整十二胺用量,记录对应的最大泡沫高度和泡沫半衰期,得到最大泡沫高度和泡沫半衰期随十二胺用量的变化规律,结果如图 12 和图 13 所示。

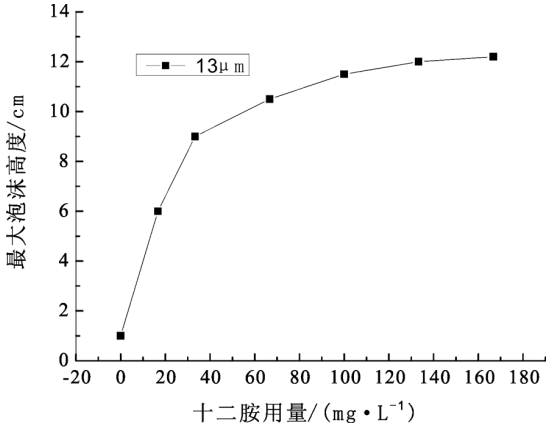

图 12　最大泡沫高度随十二胺用量变化

由图 12 可知,随着十二胺用量的增大,最大泡沫高度先逐渐增大,当十二胺用量为 120 mg/L 时,最大泡沫高度达到最大值,而后保持不变。由图 13 可以看出,随十二胺用量的增大,泡沫半衰期表现出与最大泡沫高度类似的变化规律,即先逐渐增大,当十二胺用量为 120 mg/L 时,泡沫半衰期达到最大值,而后保持不变。在相同的十二胺用量的条件下,褐铁矿的半衰期比相同粒度的石英、方解石的半衰期时间长;在相同的十二胺用量相同的粒度条件下,褐铁矿的最大高度比相同粒度的石英,方解石的最大高度更大。这表明三种矿泥对泡沫稳定性的影响大小关系为:褐铁矿 > 方解石 > 石英。

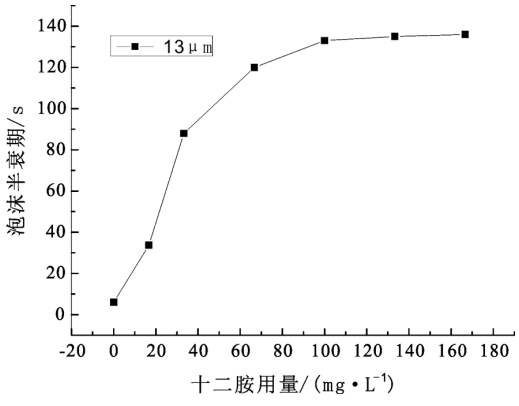

图 13　泡沫半衰期随十二胺用量变化图

综合上述试验发现三相泡沫稳定性比两相泡沫稳定性要好,它的主要原因包括以下两个方面:(1)粘附有颗粒的气 - 液界面,相当于有一层刚性实体存在于两气泡之间的液膜内,液膜得到来自于颗粒的机械支撑作用,其抗外界扰动能力强于两相泡沫;(2)颗粒在泡沫内微量液体中的存在,一定程度上会增大液体的表观粘度从而增加其排液的粘滞力,使液膜的排液速度减慢,提高泡沫的稳定性[17]。

3.2.4　硫化钠对泡沫稳定性的影响

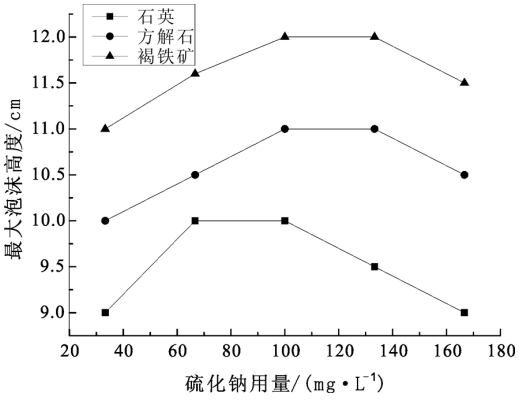

图 14　最大泡沫高度随硫化钠用量变化图

按照上述试验方法,固定十二胺用量 100 mg/L、充气量 0.04 m^3/h,石英、方解石、褐铁矿粒度均为 13 μm,调整硫化钠用量,记录对应的最大泡沫高度和泡沫半衰期,得到最大泡沫高度和泡沫半衰期随硫化钠用量的变化规律,结果如图 14 和图 15 所示。由图 14 可知,随着硫化钠用量的增大最大高度先增大后保持不变,但是增长幅度不是很大,只有

(下转第 64 页)

万方数据

[21] 郭翠香. 碱浸 - 电解法从含铅废物和贫杂氧化铅矿中提取铅工艺及机理[D]. 上海:同济大学,2008.
[22] 杨天足,刘珍珍,任晋,等. Cu(II) - Glu^{2-} - CO_3^{2-} - H_2O体系热力学平衡分析[J]. 过程工程学报,2009,9(4):745 - 749.
[23] 杨天足,任晋,刘伟锋,等. Zn(Ⅱ) - Glu^{2-} - CO_3^{2-} - H_2O体系热力学平衡分析[J]. 中国有色金属学报,2009,19(6):1155 - 1161.
[24] DOU Aichun, YANG Tianzu, YANG Jixing, et al. Leaching of low grade zinc oxide ores in Ida^{2-} - H_2O system[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2011, 21(11): 2548 - 2553.
[25] 窦爱春,杨天足,吴江华,等. Zn^{2+} - Ida^{2-} - CO_3^{2-} - H_2O体系浸出液中锌的回收及浸出剂再生[J]. 中国有色金属学报,2011,21(12):3218 - 3225.
[26] YANG Tianzu, DOU Aichun, LEI Cunmao, et al. Ligand selection for complex - leaching valuable metals in hydrometallurgy[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2010, 20(6): 1148 - 1153.
[27] DEAN J A. Lange's Handbook of Chemistry (15th Ed)[M]. WEI Junfa. Beijing: Science Press, 2003: 6.143 - 6.144, 6.120, 8.81 - 8.82.
[28] Martell A E, Smith R M. Critical stability constants Critical stability constants (volume 1: Amino Acids)[M]. New York and London: Plenum Press, 1974:1.
[29] Martell A E, Smith R M. Critical stability constants Critical stability constants (volume 4: Inorganic Ligands)[M]. New York and London: Plenum Press, 1974:1,37 - 38.

(上接第 57 页)

1 cm 左右。由图 15 可以看出,随着硫化钠用量的增大半衰期逐渐减小,泡沫稳定性变差,泡沫稳定性大小关系为褐铁矿 > 方解石 > 石英。

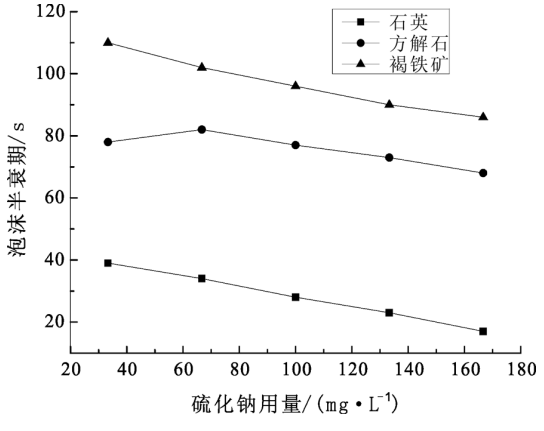

图 15　泡沫半衰期随硫化钠用量变化图

4　结 论

(1)随着十二胺用量的增大,最大泡沫高度和半衰期逐渐增大,泡沫稳定性逐渐增强;随着硫化钠用量的增大,最大泡沫高度和半衰期先增大后减小,泡沫稳定性先增强后变差。

(2)相同条件下三相泡沫的最大高度和半衰期明显大于两相泡沫,矿泥对泡沫稳定性具有显著的强化作用,而且这种强化作用随着矿泥的粒度减小而逐渐增强;不同种类矿泥对泡沫稳定性增强作用大小关系为褐铁矿 > 方解石 > 石英。

参考文献:

万方数据

[1] 雷力,周兴龙,文书明,等. 我国铅锌矿资源特点及开发利用现状[J]. 矿业快报,2007(9):1 - 4.
[2] 唐双华,覃文庆,何名飞,等. 氧化锌矿硫化 - 胺法浮选及浸出研究[J]. 湖南有色金属,2007(3):5 - 7.
[3] 朱从杰. 矿泥对氧化锌矿物浮选行为的影响[J]. 矿产综合利用,2005(1):7 - 11.
[4] 李明晓,刘殿文,张文彬. 矿泥对某氧化锌矿石浮选指标的影响[J]. 昆明理工大学学报(理工版),2010(5):7 - 9.
[5] 杨柳毅,章晓林,李明晓,等. 兰坪低品位氧化锌矿脱泥浮选新工艺试验研究[J]. 矿冶,2012(1):4 - 7.
[6] 陈晔,陈建华,李玉琼. 异极矿氧化锌矿石浮选试验研究[J]. 矿业研究与开发,2008(4):38 - 40,85.
[7] 卢建安. 高泥高铁氧化锌矿浮选理论与工艺研究[D]. 长沙:中南大学,2014.
[8] 李柏淡,金华爱,吉干芳. 氧化锌矿石浮选研究[J]. 矿冶工程,1987(1):25 - 29.
[9] 周怡玫,严志明,汤小军,等. 从四川某铅锌矿尾矿中回收氧化锌的选矿工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分),2008(1):11 - 15.
[10] 梁永忠,薛问亚. 滑石浮选泡沫稳定性及浮选行为研究[J]. 非金属矿,1994(4):21 - 23.
[11] 邓海波,张刚,任海洋,等. 季铵盐和十二胺对云母类矿物浮选行为和泡沫稳定性的影响[J]. 非金属矿,2012(6):23 - 25.
[12] 韩来兵,付晓恒,赵海铭,等. 捕收剂和起泡剂对浮选精煤三相泡沫稳定性的影响[J]. 选煤技术,2015(2):4 - 7.
[13] 冉进财,李国胜,曹亦俊,等. 无机盐阳离子对粉煤灰浮选泡沫稳定性的影响研究[J]. 煤炭学报,2015(3):646 - 651.
[14] 穆枭,冯其明,陈建华,等. 铝土矿浮选三相泡沫稳定性研究[J]. 中国矿业,2008(1):81 - 83,97.
[15] 张文才. 铝土矿柱浮选泡沫稳定性与分选效果关系的研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
[16] 徐振洪,朱建华,张荣曾. 浮选起泡剂泡沫稳定性的评价方法研究[J]. 化工学报,1999(3):399 - 403.
[17] 李国胜. 浮选泡沫的稳定性调控及粉煤灰脱炭研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2013.